

Pelat Shell Tipis Sebagai Alternatif Sistem Lantai Yang Eko-Efisien

Amin Sumadyo*¹⁾, Sri Yuliani²⁾, Purwanto Setyo Nugroho³⁾

¹⁾Prodi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir Sutami 36A Ketingan Jebres Surakarta, 57126, Indonesia

²⁾Grup Riset Arsitektur Berkelanjutan, Prodi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir Sutami 36A Ketingan Jebres Surakarta, 57126, Indonesia

³⁾Grup Riset Arsitektur Berkelanjutan, Prodi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir Sutami 36A Ketingan Jebres Surakarta, 57126, Indonesia

E-mail: amiensumadyo@staff.uns.ac.id, sriyuliani71@staff.uns.ac.id, purwantosetyonugroho@staff.uns.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini mengusulkan penggunaan pelat shell tipis sebagai alternatif sistem lantai ringan yang eko-efisien dalam konstruksi. Ekonomis dalam menekan biaya konstruksi, dan efisien dalam kinerja strukturnya. Tujuannya adalah mendapatkan desain alternatif sistem lantai pada bangunan bertingkat. Penggunaan beton shell tipis dengan perkuatan serat fiber digunakan untuk mengurangi emisi karbon tanpa mengurangi kekuatan strukturalnya. Dua desain lantai, plat lantai beton *waffle* konvensional dan plat lantai beton shell *hyperbolic paraboloid (hypar)*, dibandingkan dalam penelitian ini. Hasil menunjukkan bahwa plat lantai *hypar* memiliki berat beton yang lebih rendah dan lebih efisien dalam penggunaan material. Analisis numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS R2 menunjukkan bahwa struktur *hypar* mampu menahan beban dan memiliki stabilitas yang memadai sesuai dengan standar yang diizinkan. Dengan pendekatan inovatif ini, penelitian ini menawarkan solusi untuk mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi dan mendorong perubahan paradigma dalam desain dan konstruksi bangunan.

1. Pendahuluan

Sektor konstruksi merupakan kontributor utama dalam emisi karbon global. Produksi beton dan baja, yang merupakan material utama dalam konstruksi, mengakibatkan emisi karbon yang signifikan. Beton diperkirakan memakan 8% dari emisi CO₂ global, sementara baja memakan 9%, dengan sekitar setengah dari total emisi baja diperuntukkan untuk industri konstruksi (Mangabhai et al., 2019). Beberapa usaha guna menekan laju emisi karbon sudah direkomendasikan, diantaranya mengurangi volume beton, mengurangi kandungan PC dalam beton, dan mengurangi kandungan klinker dalam bahan semen (Findik, 2022)

Dalam konteks ini, inovasi dalam desain dan material struktur menjadi kunci untuk mengubah paradigma konstruksi. Pendekatan ekologi dan efisiensi/eko-efisien diterapkan untuk mengurangi penggunaan sumber daya alam, meningkatkan efisiensi energi, dan mengurangi dampak lingkungan dari proses konstruksi dan penggunaan bangunan. Tantangan utama yang dihadapi industri konstruksi adalah bagaimana mengintegrasikan inovasi dan efisiensi tanpa mengorbankan kualitas kekuatannya. Ini memerlukan pendekatan komprehensif dari sisi disiplin *engineering*, yang mempertimbangkan aspek material, perilaku struktur, hingga pelaksanaan di lapangan.

Jurnal ini membahas bagaimana inovasi geometri plat lantai mampu memberikan efisiensi pengurangan volume beton, dengan tidak mengurangi kekuatan fungsi struktur. Penggunaan material seperti beton shell tipis dengan perkuatan serat fiber merupakan strategi untuk mengurangi karbon yang terkandung dalam desain struktural. Penelitian bertujuan untuk mendapatkan desain alternatif sistem lantai pada bangunan bertingkat.

Pentingnya Struktur Ramah Karbon

Inovasi dalam struktur ramah karbon adalah kunci untuk mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi. Berikut adalah beberapa pendekatan inovatif yang dapat digunakan untuk menciptakan struktur yang lebih efisien secara karbon. Optimisasi Desain Struktural, menggunakan teknik desain yang meminimalkan jumlah material yang diperlukan tanpa mengurangi kekuatan struktural. Yang kedua, menggunakan perkuatan Tekstil, menggunakan bahan Textile Reinforced Concrete / TRC untuk menciptakan struktur yang lebih ringan dan lebih kuat, yang dapat mengurangi jumlah material yang diperlukan.

Usaha untuk mengefisienkan penggunaan volume material, mengambil ide kekuatan bentuk lengkung sebagai solusi reduksi volume bahan. Bentuk lengkung membran shell bisa mereduksi kuat tarik pada balok plat lantai. Bidang *hyperbolic paraboloid* yang dikonfigurasi membentuk fungsi *slab* pada bangunan bertingkat dengan bentang kolom yang tidak terlalu besar. Mengurangi beban bangunan dan volume material beton sangat berperan mengurangi emisi karbon, yang juga dapat mengurangi dimensi kolom dan fondasi (Hawkins et al., 2020).

Kandungan karbon pada bahan konstruksi merujuk pada jumlah karbon dioksida (CO₂) yang dikeluarkan selama proses pembuatan, pengangkutan, dan pemasangan material konstruksi (Hammond & Jones, 2008). Ini mencakup semua tahapan dari ekstraksi bahan baku hingga produksi dan penggunaan material dalam konstruksi.

Tabel 1. Nilai *Coefficient Energy Carbon*

No.	Nama Material & Komponen	Nilai Emisi (KgCO ₂)
1	Cement	0,74
2	Cocrete	0,107
3	Bar and Rod	1,31
4	Ceramics	0,66
5	Plywood	0,81
6	Timber	0,45
7	Glass	0,86
8	Aluminium	1,69
9	Sand	0,0048
10	Paint	2,42
11	Gravel	0,0048
12	Water	0,001

Sumber: Inventory Of Carbon And Energy (2021)

Struktur shell yang lazim disebut shell memiliki sifat khas yaitu memiliki efisiensi mekanis yang lebih baik dibandingkan dengan struktur lainnya. Stabilitas yang dimiliki struktur shell bergantung pada konfigurasi dan bukan pada massanya. Dengan desain yang baik, struktur shell dapat digunakan untuk menopang beban besar dan memberikan naungan ruang dengan volume bahan yang lebih tipis. Kemudian dari segi estetika, keindahan struktur tercipta dari bentuk tektonikanya secara alami. Sesuai dengan karakternya bahwa untuk bisa terbentang dengan stabil, diperlakukan rekayasa geometri pada bidang strukturnya. Modifikasi bentuk ini pada akhirnya akan meningkatkan kinerja perilaku struktur dengan lebih baik. Parameter yang mungkin bisa dicapai antara lain mengusahakan distribusi tegangan pada seluruh bidang shell secara merata. Dengan demikian permukaan shell akan bebas dari lentur atau setidaknya memiliki nilai lentur yang dapat diterima (Tomás & Martí, 2010).

2. Metode Penelitian

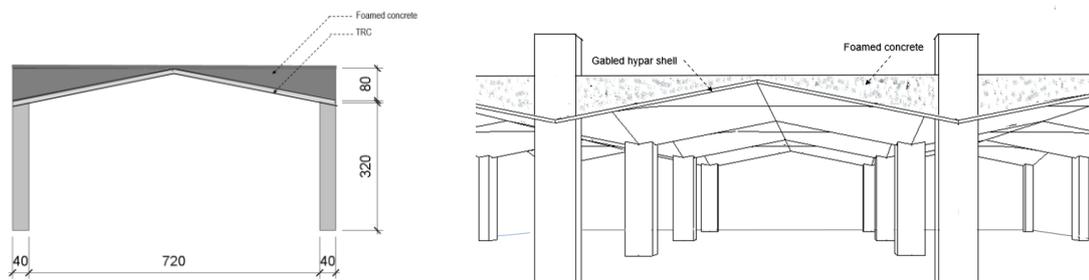
Penelitian ini membandingkan penggunaan struktur plat lantai desain *waffle* dengan plat lantai beton shell *hyperbolic paraboloid* (*hypar*). Plat lantai *waffle* merupakan plat datar konvensional yang akan dihitung dan diperbandingkan reduksi volume beton dan emisi karbonnya, ketika digantikan dengan plat beton shell tipis. Penelitian ini menggunakan nilai dari *embodied carbon* yang artinya emisi karbon tersimpan dalam suatu material bangunan. Selanjutnya struktur shell *hypar* akan diuji kemampuan layanan strukturnya terhadap angka defleksi statis yang dihasilkan dari geometrinya.

Proses pengerjaan diawali dengan *building modelling* menggunakan Revit Autodesk 2022 untuk menentukan dimensi dan volume struktur. Kemudian penghitungan nilai emisi karbon menggunakan pendekatan nilai inventori *embodied energy* dari University of Bath (Hammond & Jones, 2008). Perbandingan selisih emisi karbon kedua model plat lantai dilakukan dengan cara membandingkan selisih total emisi karbon, di mana selisih nilai emisi karbon ini yang akan dikonversikan ke nilai rupiah.

3. Hasil dan Pembahasan

Pemodelan 3D digunakan untuk mendapatkan dimensi dan besaran struktur plat lantai. Karena yang diperbandingkan hanya struktur plat lantai, maka struktur pendukung bangunan secara keseluruhan diasumsikan sama. Desain prototipe diturunkan dari bentuk dasar *hypar* dengan rusuk lurus atau dinamakan *hypar with straight edges* (Rha et al., 2015). Konfigurasi sistem lantai yang diusulkan memiliki spesifikasi sebagai berikut.

Jarak antar empat kolom penyangga direncanakan 8 x 8 meter persegi. Proporsi panjang bentang (*l*) dengan tinggi *hypar* (*h*) adalah 1: 10 , dengan tinggi kelengkungan $h = 80\text{cm}$. Proporsi 1:10 ini mengacu pada beberapa penelitian tentang geometri *hypar* yang mempertimbangkan fungsi dan estetika ruang di bawahnya.



Gambar 1. Dimensi shell hypar untuk sistem lantai bertingkat

Ketebalan shell direncanakan 6 cm, menggunakan material beton TRC. Sebagai pengisi antara bidang lengkung *hypar* dengan bidang lantai horizontal, diisi bahan beton ringan *geofom*. Jumlah beban hidup direncanakan 200 Kg/m² untuk penggunaan fungsi aktivitas setara perkantoran (SNI-1727-2013) dan diterapkan secara seragam di atas area lantai. Bobot satuan shell = 24kN/m³ diasumsikan dalam estimasi berat sendiri. Berat spesifik *geofom* adalah 8kN/m³.

Efisiensi Berat Beton

Berdasarkan informasi *modelling*, didapatkan volume beton shell sebesar 4,15 m³ dengan berat beton 9.960 kg ; dan volume *geofom* 12,8 m³ dengan berat 10.240 kg.

Dibandingkan dengan plat lantai konvensional dengan bentang yang sama, total volume betonnya adalah 14,45 m³ dengan berat beton total 34.680 kg.

Maka, lantai *hypar* memiliki berat beton 58% dibandingkan pelat lantai konvensional, dengan kata lain terjadi pengurangan berat beton sebesar 42%.

Pengurangan Emisi Karbon

Berdasarkan angka emisi karbon, plat lantai konvensional memiliki jumlah emisi 3710,76 kgCO₂ sedangkan plat lantai shell *hypar* memiliki jumlah emisi setengahnya yaitu 1884,92 kgCO₂

Tabel 2. Perbandingan nilai emisi karbon pada pelat beton konvensional dan pelat beton *hypar*

Struktur	Berat (kg)	Coefficient energy carbon (kgCO ₂ /Kg)	Emisi karbon (kgCO ₂)	Jumlah emisi karbon struktur (kgCO ₂)
Plat lantai konvensional	34680	0,107	3710,76	3710,76
Plat lantai shell <i>hypar</i> + Agregat	9960 10240	0,107 0,080	1065,72 819,20	1884,92

Kemampuan Struktur

Analisis numerik dilakukan untuk memprediksi respons struktur secara fisik (Kim et al., 2012).

Kemampuan struktur prototipe diuji secara simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS R2, yang terintegrasi dengan Building Information Modelling menggunakan Revit Autodesk. Target yang dicapai antara lain prediksi deformasi *bending* dan *buckling*.

Tabel 3. Hasil lendutan (*bending*)

L (cm)	h / L	h (cm)	Deformation max, 2500 N (cm)	Deformation max, 10000 N (cm)	batas lendutan ijin (SNI 03 2847 2002) 1/360
800	1:10	80	0,49	1,98	2,22

Tabel 4. Hasil deformasi tekuk (*buckling*)

L (cm)	h / L	h (cm)	Pembebanan rusuk (kg)	Pembebanan tengah (kg)	Pembebanan merata bidang (kg)
800	1:10	80	130.452	177.575	344.850

Dari simulasi numerik terhadap prototipe didapatkan hasil berupa nilai lendutan dan nilai deformasi tekuk. Pada pembebanan 2500 N dan 10000 N, deformasi struktur sebesar 0,49 cm dan 1,98 cm. Angka tersebut masih aman, di bawah lendutan yang diizinkan 2,22 cm berdasarkan SNI 03-2847-2002.

Hasil deformasi tekuk ditunjukkan dari simulasi berikutnya. Angka tersebut menunjukkan bahwa struktur mengalami kegagalan awal pada angka *buckling* 130.452 kg ; 177.575 kg ; 344.850 kg. Perbedaan tersebut dipengaruhi letak titik pembebanan pada permukaan bidang lantai. Struktur lebih stabil ketika bekerja menerima beban secara merata pada permukaan shell.

4. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa penggunaan pelat shell tipis sebagai alternatif sistem lantai ringan dapat secara efisien mengurangi penggunaan beton dan emisi karbon dalam konstruksi, tanpa mengorbankan kekuatan struktural. Dengan menggunakan beton shell tipis yang diperkuat dengan serat fiber, dapat diwujudkan desain lantai yang lebih eko-efisien.

Penelitian ini menunjukkan bahwa plat lantai *hypar* (*hyperbolic paraboloid*) memiliki berat beton yang lebih rendah dan lebih efisien dalam penggunaan material dibandingkan dengan plat lantai konvensional.

Analisis numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS menunjukkan bahwa struktur pelat lantai *hypar* mampu menahan beban dan memiliki stabilitas yang memadai, sesuai dengan standar yang diizinkan. Dengan demikian, pendekatan inovatif ini dapat menjadi solusi untuk mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi dan mendorong perubahan paradigma dalam desain dan konstruksi bangunan.

Ucapan terimakasih

Penelitian ini didanai oleh RKAT PTNBH Universitas Sebelas Maret Tahun Anggaran 2024 melalui skema Penelitian PENELITIAN HIBAH GRUP RISET (PENELITIAN HGR-UNS) B dengan Nomor Surat Perjanjian Penugasan Penelitian : 194.2/UN27.22/PT.01.03/2024

Daftar Pustaka

- Findik, F. (2022). Green concrete for structural buildings. *Heritage and Sustainable Development*, 4(1), 67–76. <https://doi.org/10.37868/hsd.v4i1.84>
- Hammond, G., & Jones, C. (2008). *INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE)*.
- Hawkins, W., Orr, J., Ibell, T., & Shepherd, P. (2020). A design methodology to reduce the embodied carbon of concrete buildings using thin-shell floors. *Engineering Structures*, 207, 110195. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110195>
- Kim, S.-N., Yu, E.-J., & Rha, C.-S. (2012). Finite Element Analysis of Gabled Hyperbolic Paraboloid Shells Subjected to Support Movements. *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, 12(4), 57–69. <https://doi.org/10.9712/KASS.2012.12.4.057>
- Mangabhai, R., Bai, Y., Ghazizadeh, S., & Shi, S. (2019). *1st International Conference on Innovation in Low-Carbon Cement and Concrete Technology*.
- Rha, C.-S., Kim, S.-N., & Yu, E. (2015). Behavior of Gabled Hyperbolic Paraboloid Shells. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 14(1), 159–166. <https://doi.org/10.3130/jaabe.14.159>
- Tomás, A., & Martí, P. (2010). Shape and size optimisation of concrete shells. *Engineering Structures*, 32(6), 1650–1658. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.02.013>